IGBT's

IGBT is het letterwoord van 'Insulated Gate Bipolar Transistor'. Het onderdeel is een combinatie van een bipolaire junctie transistor (BJT) en een metaaloxide veldeffect transistor (MOS-FET). Een IGBT is een ideaal onderdeel voor het schakelen van grote vermogens.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 10-12-2018

Kennismaking met de IGBT

Inleiding

Een gewone bipolaire vermogenstransistor heeft een zeer lage verzadigingsspanning tussen emitter en collector. Het nadeel is dat u een vrij hoge stroom in de basis moet sturen om de halfgeleider in die verzadigingstoestand te sturen. Een MOSFET heeft een zeer klein stuurvermogen nodig. Het ligt voor de hand dat het aantrekkelijk is de voordelen van een bipolaire vermogenstransistor te combineren met de voordelen van een MOSFET. De synthese is de IGBT, **I**nsulated **G**ate **B**ipolar **T**ransistor, een bipolaire transistor die niet met een stroom vanuit een basis wordt gestuurd, maar met een spanning vanuit een geïsoleerde gate.

Het symbool van een IGBT

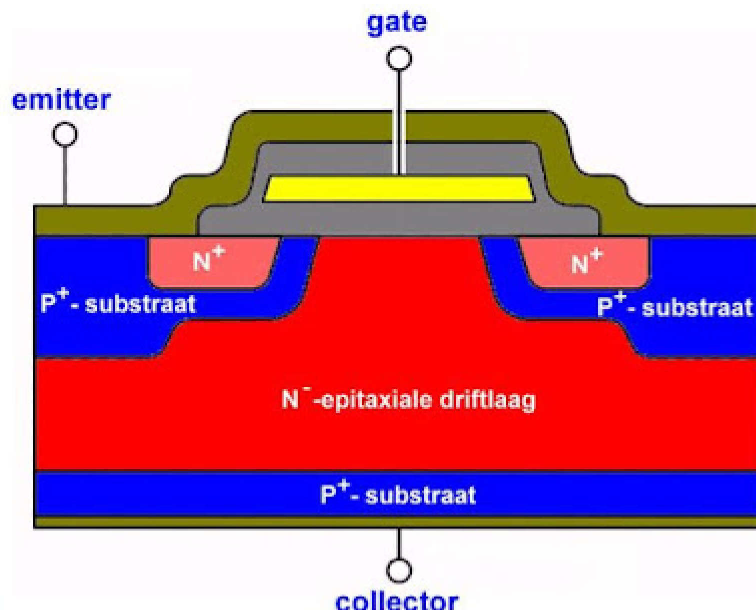
Het zal u niet verbazen dat de samenstelling van een IGBT, MOSFET en bipolaire transistor, ook in het symbool is terug te vinden, zie onderstaande afbeelding. Er bestaan echter vier verschillende types van IGBT's, die worden voorgesteld door vier verschillende symbolen. Afhankelijk van de doping van het basismateriaal kunt u n- en p-kanaal IGBT's aantreffen. Deze kunt u nog eens indelen in een normaal-geleidend en een normaal-isolerend type. Deze eigenschap kan tijdens het productieproces worden geselecteerd.



De symbolen van de vier soorten IGBT's. (© 2018 Jos Verstraten)

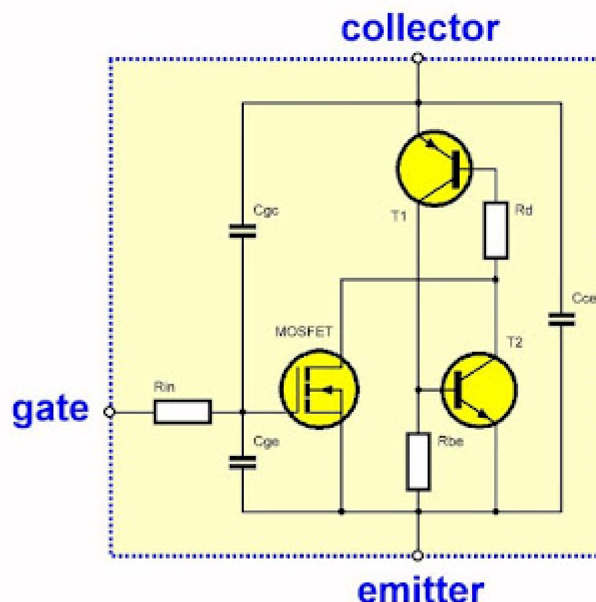
De samenstelling van een IGBT

In de onderstaande figuur ziet u een verticale doorsnede door een n-kanaal IGBT, het meest voorkomende type. De IGBT is samengesteld als een vierlaags halfgeleidersandwich die door de gate wordt aangestuurd. Het heeft een homogeen en sterk gedoteerd p^+-substraat met een speciaal gevormde p^+/n^+ verbinding aan de achterzijde. Op dit dragermateriaal wordt een zwak gedoteerde n^- epitaxiale laag aangebracht. Hierin worden twee hoog gedoteerde p^+ eilanden door diffusie geïntroduceerd. De isolerende oxidelaag tussen de gate en de p/n-lagen is verantwoordelijk voor de eigenschappen van de IGBT.



De samenstelling van een N-kanaal IGBT. (© 2018 Jos Verstraten)

Het equivalent schema van een IGBT
Uit wat u tot nu toe hebt geleerd is gemakkelijk het equivalent schema van een IGBT samen te stellen, zie onderstaande figuur. Naast de N-kanaal MOSFET en de PNP-transistor T1 ziet u echter ook een parasitaire NPN-transistor T2, die het gevolg is van de fysische eigenschappen van de noodzakelijke halfgeleidersandwich. Dat is vervelend, want deze transistor vormt samen met T1 een soort van thyristor-structuur. Nu kunnen twee op deze manier geschakelde transistoren het bekende 'latch-up'-verschijnsel gaan vertonen dat onmisbaar is bij een thyristor maar dat u hier kunt missen als kiespijn. De twee transistoren houden elkaar dan in geleiding en het onderdeel is niet meer uit te schakelen. Gelukkig kan men, door een uitgekiende constructie van de halfgeleiderlagen toe te passen, dit verschijnsel minimaliseren. Bovendien kunt u de gate op een dergelijke manier aansturen dat er ook schakeltechnisch weinig kans op latching bestaat.



Het equivalent schema van een N-kanaal IGBT.
(© 2018 Jos Verstraten)

De werking van een IGBT
Aan de ingang gedraagt een IGBT zich als een MOSFET en aan de uitgang als een bipolaire vermogenstransistor. De MOSFET en de transistor T1 zijn opgenomen in een pseudeo-darlington circuit. U moet een positieve spanning aansluiten op de collector ten opzichte van de emitter. De sturing kan worden verdeeld in twee gebieden: een spergebied en een

geleidingsgebied.
Zolang de drempelspanning U_{ge} van de MOSFET niet is bereikt op de gate ten opzichte van de emitter staat de IGBT in de spermodus. Als u de spanning op de gate verhoogt tot boven U_{ge} komt de IGBT in de geleidingsmodus terecht. Net als bij normale veldeffect transistoren vormt zich een geleidend n-kanaal in het p-substraat. Dit maakt elektronentransport van de emitter naar de epitaxiale laag mogelijk. Aangezien de achterste p/n-junctie is aangesloten in de voorwaartse richting, worden gaten geïnjecteerd van het p^+ substraat in de epitaxiale laag, wat resulteert in een elektron/gat-paar dat de werkelijke geleiding veroorzaakt.
Zoals reeds even terloops vermeld, heeft de vierlaags halfgeleiderconstructie het risico in zich dat er een parasitaire thyristor wordt gevormd door de PNP-transistor en de NPN-transistor. Net als CMOS-schakelingen kunnen IGBT's daarom het zogenaamde latch-up effect produceren. De parasitaire thyristor ontsteekt en er gaat een stroom van de collector naar de emitter vloeien die niet meer via de gate kan worden uitgeschakeld. De enige methode om uit deze 'latch-up' te ontsnappen is door de spanning over het onderdeel naar nul te reduceren.
In de geleidende modus vloeit de stroom van de collector naar de emitter. De uitgangstransistor van deze pseudo-darlington schakeling is echter nooit sterk verzadigd, zodat de spanningsval tussen de collector en de emitter iets groter is dan bij een gewone bipolaire transistor. Omdat echter de emitter van een IGBT het volledig oppervlak van de chip beslaat zijn de schakeleigenschappen beter dan deze van een vermogenstransistor met hetzelfde chip-oppervlak.
Omdat uit het equivalent schema duidelijk blijkt dat over de MOSFET geen hoge spanning kan ontstaan, kan men volstaan met het integreren van een laagspanningstype.

Geen inverse diode
In tegenstelling tot MOSFET's hebben IGBT's meestal geen ingebouwde geïntegreerde inverse diode. Als u dus inductieve belastingen schakelt is het absoluut noodzakelijk een dergelijke diode extern aan te brengen. Het is noodzakelijk hiervoor een fast recovery diode toe te passen, die een zeer kleine ladingsopslag heeft waardoor de hersteltijd extreem klein is, tussen 200 ns en 100 ns.

De eigenschappen van een IGBT

De doorslagspanning $U_{ce(s)}$
Deze grootheid definieert de maximale spanning die u tussen de collector en de emitter mag aansluiten. Op dit moment heeft men exemplaren ontwikkeld met $U_{ce(s)}$-waarden van 600 V tot 1.700 V.

De saturatiespanning $U_{ce(on)}$
In tegenstelling tot de praktijk bij MOSFET's waar de uitgang voornamelijk gekarakteriseerd wordt door de maximale AAN-weerstand $R_{ds(on)}$, spreekt men bij IGBT's weer van de verzadigingsspanning die u al tientallen jaren kent van de gewone bipolaire transistoren. Moderne UGBT's hebben een $U_{ce(on)}$ van minder dan 1,8 V.

De drempelspanning $U_{ge(dr)}$
Dit is de minimale spanning die u tussen de gate en de emitter moet aanleggen om de IGBT te laten geleiden. Deze spanning ligt tussen 3 V en 4 V en is afhankelijk van de temperatuur van de junctie.

De maximale collectorstroom $I_{c(max)}$
Deze stroom wordt meestal gedefinieerd bij een junctietemperatuur van +25 °C en +100 °C. Sommige exemplaren hebben een $I_{c(max)}$ van 3.600 A!

De Clamped Inductive Load Current $I_{c(lm)}$
Deze grootheid geeft de maximale repeterende waarde van de stroom die u door de IGBT mag sturen als deze wordt belast met een inductieve belasting in de collectorkring. Deze $I_{c(lm)}$

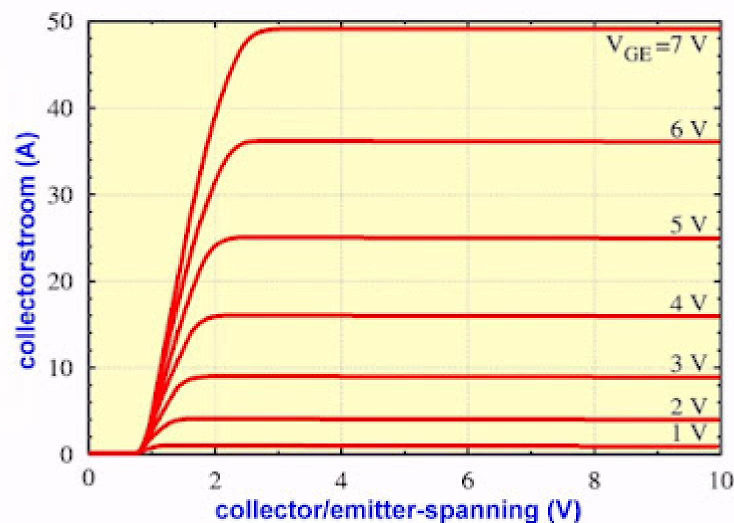
bepaalt de zogenaamde SOA (Safe Operation Area) in de uitgangskarakteristiek van de IGBT.

De transconductantie g
Geeft de verhouding tussen de variatie in de collectorstroom als gevolg van een variatie van de gate/emitter-spanning bij constant blijvende collector/emitter-spanning. Onder de vorm van een formule:
$g = \Delta I_c / \Delta U_{ge}$
Een vaak voorkomende waarde van deze grootheid ligt tussen 10 S en 30 S (siemens).

De maximale gatespanning $U_{ge(max)}$
Is de maximale waarde van de spanning die u tussen de gate en de emitter mag aanleggen. De dunne oxidelaag op de poort zorgt ervoor dat deze spanning niet erg groot mag worden, ongeveer 20 V. Let wel dat u zowel een positieve als een negatieve spanning op de gate kunt zetten. Het wordt zelfs aanbevolen de gate negatief te sturen als u de IGBT absoluut zeker naar sper wilt sturen.

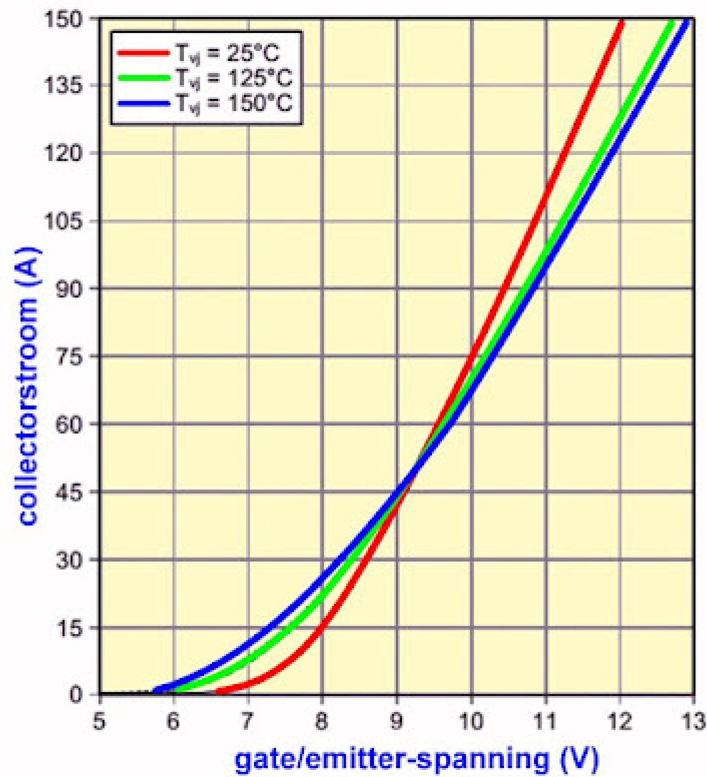
De statische eigenschappen van een IGBT

De uitgangskarakteristiek
Deze grafiek geeft het verband tussen de collector/emitter-spanning en de collectorstroom die door de IGBT gaat lopen. De variabele grootheid bij deze grafiek is uiteraard de waarde van de spanning tussen de gate en de emitter. Wat meteen opvalt is dat de curves een 'dode zone' vertonen. Onder een bepaalde spanning tussen de collector en de emitter vloeit er geen stroom door het onderdeel.



De uitgangskarakteristiek van een N-kanaal IGBT. (© 2018 Jos Verstraten)

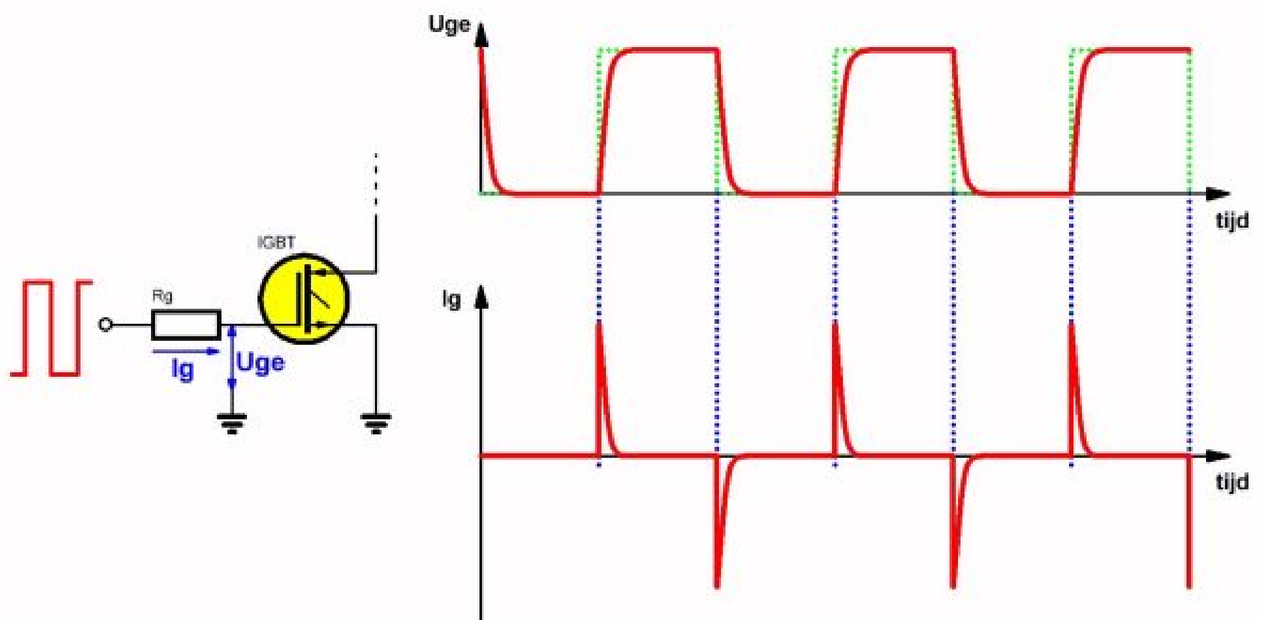
De transferkarakteristiek
Deze grafiek geeft het verband tussen de collectorstroom en de gate/emitter-spanning bij een bepaalde constante collector/emitter-spanning. Deze karakteristiek is afhankelijk van de temperatuur.



De transferkarakteristiek van een N-kanaal IGBT. (© 2018 Jos Verstraten)

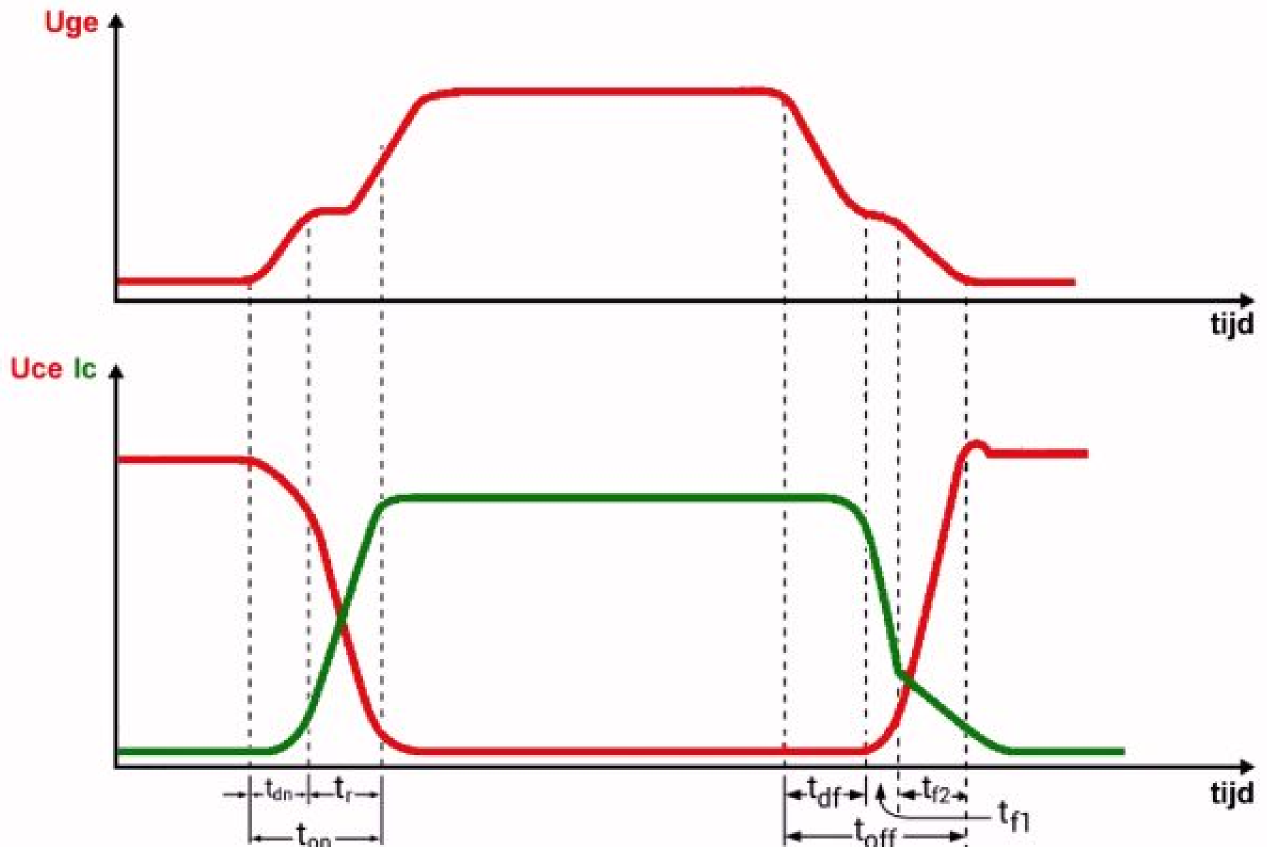
De dynamische eigenschappen van een IGBT

Spanningsgestuurd onderdeel, maar tóch ingangsstroom
Vanwege de MOSFET aan de ingang is een IGBT een spanningsgestuurd onderdeel. Dat betekent dat u een gelijkspanning op de gate moet aansluiten en geen gelijkstroom in dit onderdeel moet sturen. Dat wil niet zeggen dat er geen stroom in de ingangsschakeling te meten valt. Bij het in- en uitschakelen van de IGBT zult u inderdaad een meetbare stroom in en uit de gate zien vloeien, namelijk de stroom die nodig is voor het laden en ontladen van de ingangscapaciteit. Bovendien staat er een parasitaire capaciteit tussen de gate en de collector en ook deze zal voor elektronenbewegingen van en naar de gate zorgen, het zogenaamde Miller-effect. Dit is voorgesteld in onderstaande figuur.



De spanning op en de stroom in/uit de gate. (© 2018 Jos Verstraten)

Het dynamisch gedrag bij het in- en uitschakelen van een belasting
Bij het aanleggen van een gatespanning neemt de U_{ge} toe, afhankelijk van de serieweerstand Rg en de ingangscapaciteit van de IGBT. Na een bepaalde vertragingstijd wordt de drempelspanning $U_{ge(dr)}$ bereikt en begint er collectorstroom door de halfgeleider te vloeien. Terwijl de collectorstroom stijgt zal de collector/emitter-spanning dalen. De gatespanning stijgt vervolgens verder tot de waarde van de aangelegde stuurspanning, maar de collectorstroom zal uiteraard niet verder stijgen. De maximale waarde wordt immers bepaald door de grootte van de voedingsspanning en de weerstandswaarde van de belasting in de collector.



Het in- en uitschakelen van een IGBT. (© 2018 Jos Verstraten)

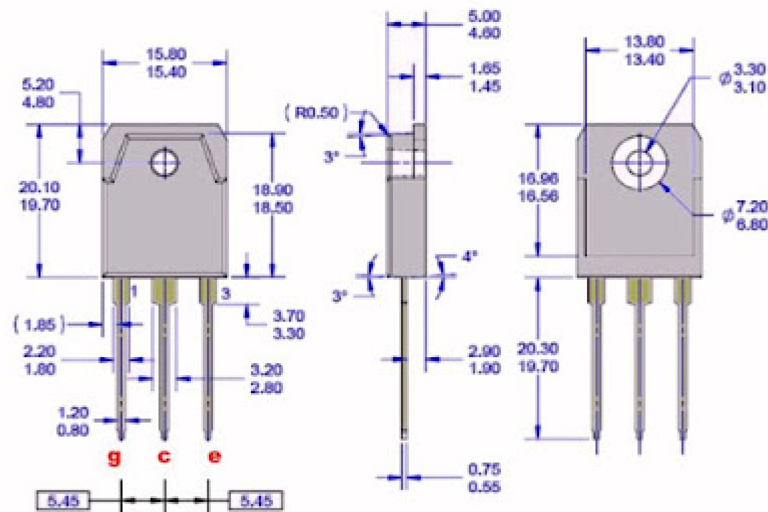
De in- en uitschakeltijden
De inschakeltijd t_{on} is samengesteld uit twee componenten, de vertragingstijd (t_{dn}) en de stijgtijd (t_r). De vertragingstijd t_{dn} wordt gedefinieerd als de tijd waarin de collectorstroom stijgt van de lekstroom naar een/tiende van de eindwaarde van de collectorstroom I_c. De stijgtijd t_r wordt gedefinieerd als de tijd waarin de collectorstroom stijgt van een/tiende naar de eindwaarde van de collectorstroom I_c.
De uitschakeltijd t_{off} bestaat uit drie componenten, de vertragingstijd (t_{df}), de eerste daaltijd (t_{f1}) en de tweede daaltijd (t_{f2}). De vertragingstijd t_{df} wordt gedefinieerd als de tijd waarin de collectorstroom van de eindwaarde naar 90 % van deze waarde daalt. De eerste daaltijd t_{f1} is de tijd waarin de collectorstroom van 0,9 I_c naar 0,2 I_c daalt. De tweede daaltijd t_{f2} wordt gedefinieerd als de tijd die de collectorstroom I_c nodig heeft om verder te dalen van 0,2 I_c naar 0,1 I_c.

De IGBT in de praktijk

IGBT's in standaard behuizingen
IGBT's kunt u aantreffen in de behuizingen die u kent van andere vermogenshalfgeleiders, zoals TO-3 en TO-220. Dat zijn echter de kleine broertjes onder de IGBT's. Als voorbeeld stellen wij u de FGA25N120ANTD van Fairchild voor. De specificaties van deze halfgeleider

zijn:

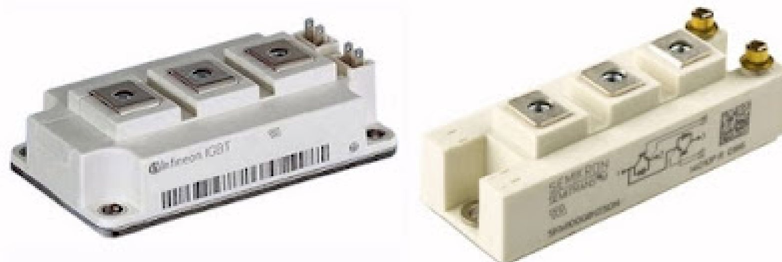
- **U_{ce}:** 1.200 V max.
- **U_{ge}:** ±20 V max.
- **$I_{c(max)}$** (25 °C): 50 A max.
- **$I_{c(max)}$** (100 °C): 25 A max.
- **$I_{c(lm)}$:** 90 A max.
- **P_{ce}** (25 °C): 312 W
- **P_{ce}** (100 °C): 125 W



De afmetingen en aansluitgegevens van een laag-vermogen IGBT. (© 2018 Jos Verstraten)

Hoog-vermogen IGBT's

IGBT's worden voornamelijk toegepast in de hoogvermogen elektronica, zoals in zware omvormers, motorbesturingen, etc. De zware exemplaren worden meestal op de markt gebracht onder de vorm van modules, waar vaak meerdere chips tot een complete schakelunit zijn geïntegreerd. In onderstaande afbeelding zijn een paar van die zware jongens voorgesteld. De linker is de FF300R06KE3 van Infineon, die 600 A en 600 V kan verwerken. De rechter module is een SKM100GB125DN van Semikron en dit onderdeel bevat twee IGBT's geschakeld als een halve brug. Deze module kan 200 A en 1.200 V verwerken.

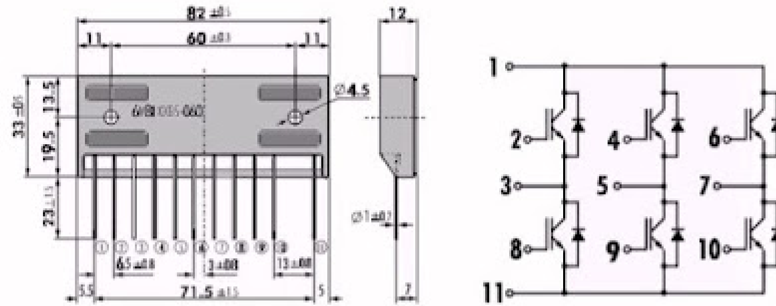


Twee voorbeelden van de zware jongens onder de IGBT's die stromen van meerdere honderden ampères kunnen verwerken. (© 2018 Jos Verstraten)

De Fuji 6MBI20GS-060

Deze in onderstaande figuur voorgestelde module bevat zes identieke IGBT's die per twee geschakeld zijn als halve brug en worden toegepast bij het werken met vermogensregelingen in drie-fasen netten. Deze module kan 600 V verdragen en 6 x 20 A verwerken. Om u een idee te geven van de prijs van een dergelijke module: op ebay zijn diverse aanbieders te vinden die deze module voor prijzen vanaf $ 15.00 aanbieden.





De 6MBI20GS-060 van Fuji is ideaal voor het verwerken van vermogens in drie-fasen netten. (© 2018 Jos Verstraten)

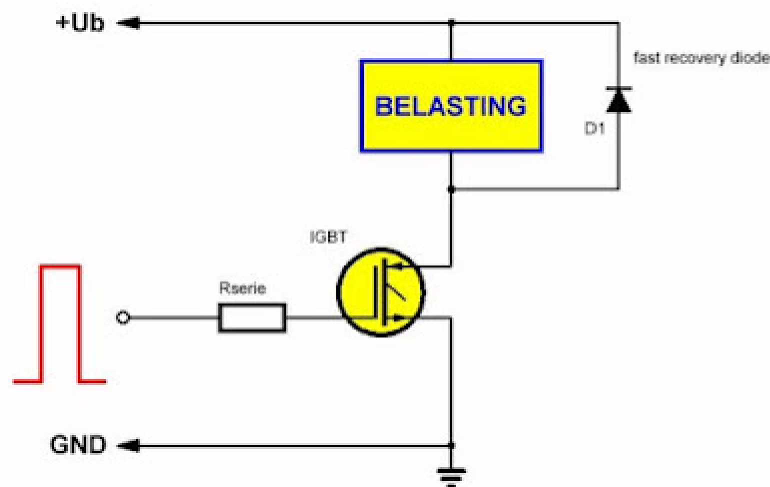
Het toepassen van IGBT's

Waar watts er toe doen

IGBT's wordt voornamelijk gebruikt in vermogen-gerelateerde toepassingen. Standaard vermogen transistoren (BJT's) hebben zeer langzame respons eigenschappen. MOSFET's zijn wél geschikt voor snel schakelen, maar zijn een zeer dure keuze als u een grote stroomsterkte moet schakelen. IGBT's zijn ideale vervangers voor zowel power BJT's als power MOSFET's.
IGBT's bieden een lagere ON-weerstand in vergelijking met BJT's en dankzij deze eigenschap is een IGBT thermisch efficiënt in toepassingen met een hoog vermogen.
Dank zij hun lage inschakelweerstand, hun zeer hoge stroomsterkten en hun vrij hoge schakelsnelheid worden IGBT's gebruikt in zware motorbesturingen, elektronische lasapparatuur, inverters en geschakelde voedingen met hoogfrequente aansturing.

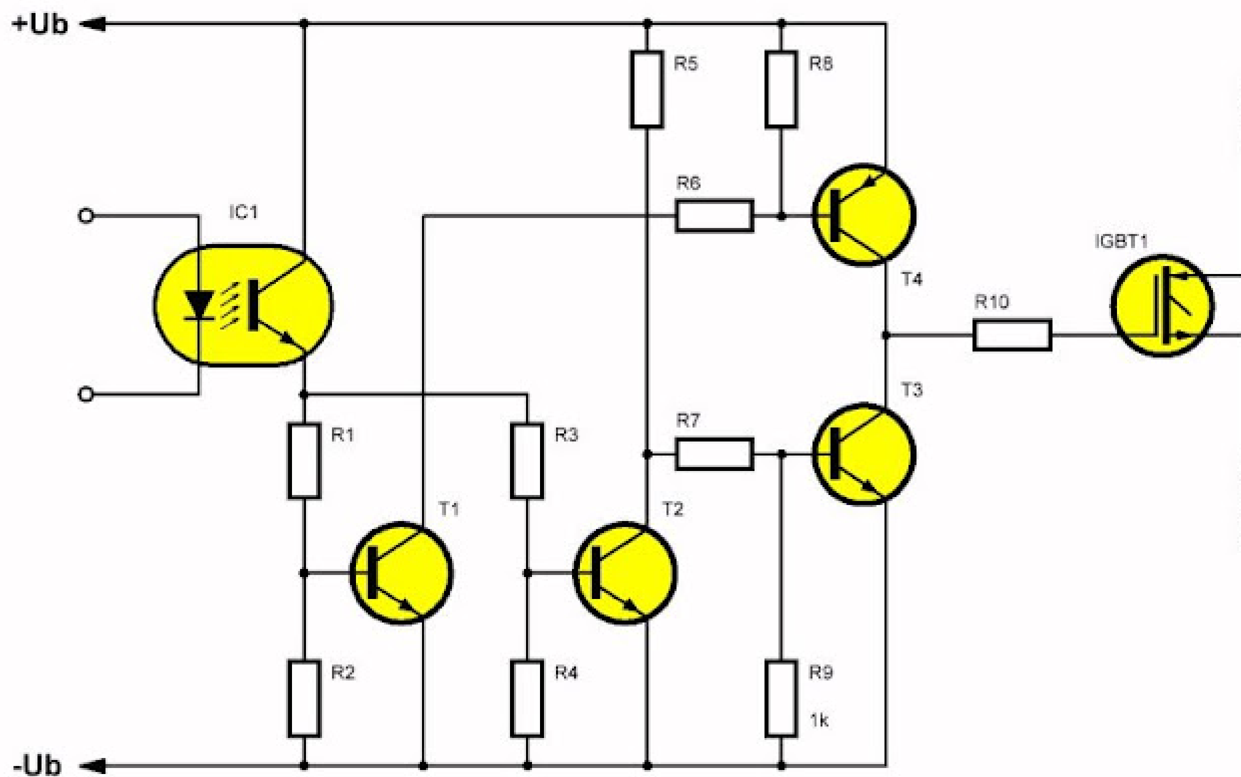
Het vermijden van het 'latch-up'-verschijnsel

IGBT's mogen nooit zonder meer op een laagimpedante stuurspanning worden aangesloten. U moet altijd een kleine weerstand in serie met de gate opnemen. Dit ene onderdeel is zeer belangrijk, want samen met de parasitaire ingangscapaciteit C_{ge} verhindert deze weerstand het optreden van het 'latch-up'-verschijnsel. Door deze RC-kring kan de U_{ge} niet zo snel stijgen dat ook de I_c zeer snel opkomt en de kritische waarde van de stroomstijging wordt overschreven waardoor de IGBT gaat latchen.
Omdat de meeste IGBT's om de een of andere reden geen inverse dioden bevatten moet u altijd een diode in sperrichting over de belasting in de collector opnemen. Het standaard schema voor het aansturen van een zware gelijkspanningsbelasting met een IGBT is getekend in onderstaande figuur en u vindt er de twee besproken componenten in terug.



De standaard schakeling rond een IGBT. (© 2018 Jos Verstraten)

Een professionele gate besturing
Omdat IGBT's meestal in schakelingen worden toegepast waar rechtstreekse voeding uit de netspanning aanwezig is, is het van het grootste belang om de gate besturing galvanisch gescheiden te verzorgen. De besturingselektronica kan dan nooit op de gevaarlijke netspanning komen te staan. In onderstaand schema is een dergelijke gate besturing getekend die wordt aanbevolen door Infineon.
Als de optische koppelaar IC1 niet wordt aangestuurd zal de interne foto-transistor niet geleiden. Over R1 en R2 valt geen spanning, T1 en T2 staan in sper. Het gevolg is dat T3 in geleiding wordt gestuurd via de basisstroom die door R5 en R7 wordt aangeleverd. Transistor T4 staat in sper. Het gevolg is dat de gate van de IGBT via R10 en T3 met de negatieve voeding $-U_b$ wordt verbonden en de IGBT spert.
Als de optische koppelaar wordt gestuurd gaat de interne transistor geleiden. Zowel T1 als T2 komen in geleiding. De geleidende T2 zorgt ervoor dat T3 naar sper gaat. De geleidende T1 brengt T4 in geleiding. De gate van de IGBT wordt met de positieve voedingsspanning $+U_b$ verbinden en het onderdeel gaat geleiden.
Merk op dat bij deze schakeling de gate niet gestuurd wordt tussen $+U_b$ en GND, maar tussen $+U_b$ en $-U_b$. Dat wordt algemeen beschouwd als een betere manier van sturing waardoor u er zeker van bent dat de IGTB nooit zal gaan geleiden op die momenten dat dit niet de bedoeling is.



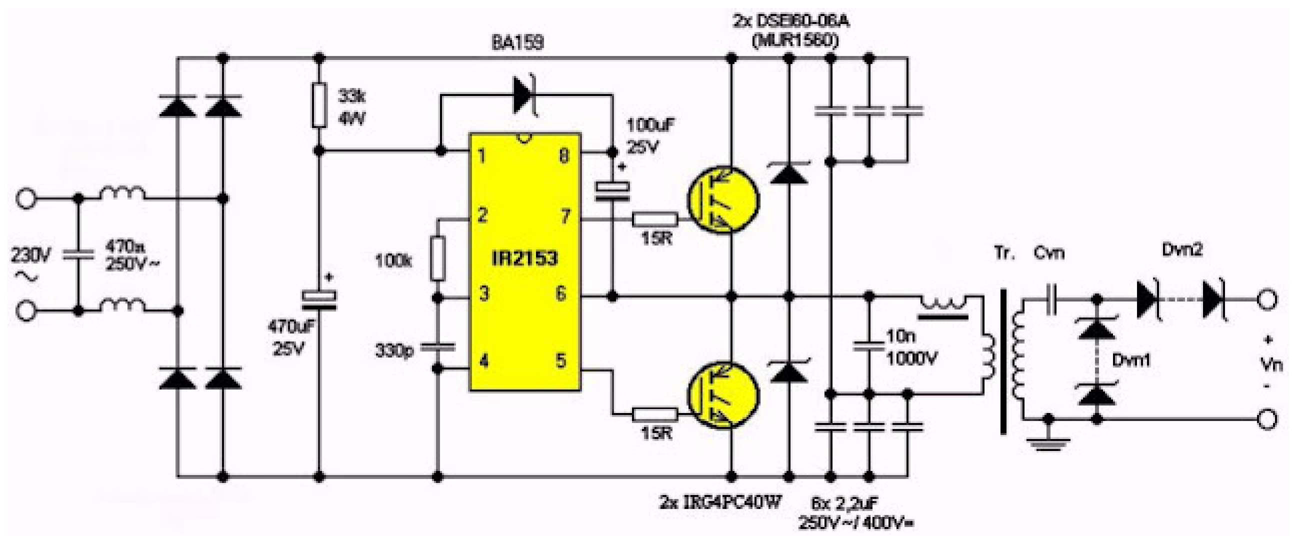
Een galvanisch gescheiden aansturing van een IGBT. (© 2018 Jos Verstraten)

Een tesla-generator met twee IGTB's

Tot slot wordt in onderstaande figuur een voorbeeld gegeven van een praktische toepassing van IGBT's. Met een tesla-generator kunt u vonken van centimeters lang opwekken. De schakeling, gepubliceerd op http://danyk.cz, wordt rechtstreeks gevoed uit de 230 V netspanning. Als driver wordt gebruik gemaakt van de geïntegreerde schakeling IR2153. Deze schakeling stuurt twee IGBT's van het type IRG4PC40W van International Rectifier. Over de IGBT's zijn antiparallelle diodes aangesloten omdat het geselecteerde type IGBT geen interne diodes heeft. De condensator van 10 nF en 1.000 V beschermt de twee transistoren tegen spanningspieken. De schakelfrequentie van de IR2153 ligt tussen 20 kHz en 25 kHz. De voedingsspanning van 15 V voor het IC wordt verkregen via de vermogensweerstand van 33 kΩ en de elco van 470 µF. Een externe zenerdiode is niet nodig, want deze is in het IC ingebouwd. De voedingsspanning van de halve brug wordt niet gefilterd.

Aan de uitgang staat een schakelende hoogspanningstransformator met een secundaire spanning van 10 kV. De spanning van de transformator wordt verhoogd met een schakeling die de spanning verdubbelt. De condensator en dioden in deze schakeling moeten zeer hoge spanningen kunnen verdragen. De condensator moet een werkspanning hebben van minimaal 1,5 keer de spanning van de transformator. De capaciteit van de condensator is niet kritisch, deze moet minimaal 30 nF zijn voor de uitgangsspanning van 8 kV en minimaal 5 nF voor de uitgangsspanning van 20 kV. De diodes moeten van het fast recovery type zijn, bijvoorbeeld UF4007 of BA159 (1 A @ 1.000 V).

De transformator wordt gewikkeld op een kern met een doorsnede van 2,5 cm^2 tot 3 cm^2 en de primaire heeft slechts 18 wikkelingen met een wikkeldraad met een diameter van 0,6 mm. De secundaire wikkeling is afhankelijk van de spanning die u wilt genereren. Als u 12.000 V op de uitgang wilt, moet de secundaire van de trafo een spanning van 6.000 V genereren. De secundaire wikkeling heeft dan 720 windingen met een draaddiameter van 0,3 mm. Eerst moet u de primaire wikkelen, dan de secundaire. In serie met de primaire wikkeling staat een spoeltje als stroombegrenzer. Dit spoeltje heeft 24 windingen van een wikkeldraad van 0,6 mm en wordt gewikkeld op een spoelvorm met een diameter van 1,7 cm^2 tot 2 cm^2.



Een tesla-generator met als hart van de schakeling twee IGBT's. (© http://danyk.cz)